

永久磁石同期電動機の位置センサレス駆動に関する実証試験研究

大西徳生^{1*} 山中建二² 北條昌秀¹

Experimental Verification of Position Sensorless Drive System for Permanent Magnet Synchronous Motor

by

Tokuo OHNISHI, Kenji YAMANAKA and Masahide HOJO

The PM motor has become increasingly popular for many applications. We proposed a novel sensor-less control system for the PM motor drive. The proposed system can be easily constructed without any motor parameters. We developed the prototype electric vehicle (EV) driven by interior permanent magnet synchronous motor using proposed sensor-less control methods.

In this paper, we describe the principle of operation of the proposed sensorless control scheme for the PM motor drive and we apply this control method to the main motor drive for EV and reports test run result of the electric vehicle, using proposed sensor-less control methods.

Keywords : Permanent Magnet Motor, Position Sensor-less Control, Vector Control, Electric Vehicle

1. まえがき

交流電動機は、パワーエレクトロニクス技術の進歩により、インバータで簡単にそして安価に制御できるようになったため、電気鉄道、電気自動車、インバータエアコン、洗濯機等の家電製品へとありとあらゆる分野に用いられている。このうち交流電動機を力強く制御するためには、交流電動機の回転速度や回転位置を検出すると共に、交流電動機の回路定数をもとに、電流ベクトルを制御する必要がある。交流電動機の中でも、特に永久磁石同期電動機は

小型軽量、高効率の観点から、丈夫で安価な誘導電動機よりも売上高でも上回るようになった¹⁾。前者の制御には回転位置検出器、後者には回転速度検出器が必要であるが、回転速度や回転位置を検出するセンサはセンサの取り付けスペースや配線による信頼性の低下およびシステムコストの上昇を招く。このため、サーボ用などの高精度の制御が必要とされる分野を除いては、システム構成の簡素化、低価格化を目的に種々のセンサレス制御法が提案され実用化されている^{1) 2)}。しかし、これまでに提案されているセンサレス制御は、電動機モデルを制御システムに組み入れるため、電動機の回路定数の設定誤差はシステムの特性に大きな影響を与えると共に電動機も特定されている。

本論文では、こうした課題を解決する新しいセンサレス制御手法³⁾を交流電動機に適用して、力強い駆動特性が得られること実証すること目的としている。

一般的な制御手法が、制御対象となる電動機の回路定数を用いて回転位置を推定しているのに対して、新しいセンサレス制御は、インバータから出力する二軸成分電圧をも

1 徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部
Institute of Technology and Science,
Graduate School of The University of Tokushima

2 徳島大学大学院先端技術科学教育部
Graduate School of Advanced Technology and Science,
The University of Tokushima

3 連絡先 〒770-8506 徳島市南常三島町2-1
徳島大学大学院ソシオテクノサイエンス研究部

とに、位相追従制御によっているため、基本的には回路定数の変動等の影響を受けないため、ロバストなシステムを構成することができる点に極めて大きな特色がある³⁾。

本稿では、新しく提案するセンサレス制御手法の基本原則と制御システムを述べ、種々の実験特性を通じて有効性を明らかにする^{4) - 7)}。また、提案する制御システムを永久磁石同期電動機で駆動する電気自動車に適用し⁸⁾、試作した EV の走行実証試験を行った結果についても報告する。

2. センサレス制御システムと基本原理

< 2. 1 > 基本式

図 1 に提案しているセンサレス制御システム構成を示す。回転座標変換(δ - γ 軸)をおこなった永久磁石同期電動機の方程式は次式で示される。

$$\begin{aligned} V_\gamma &= RI_\gamma + L \frac{dI_\gamma}{dt} - \omega LI_\delta + E_a \sin \beta \\ V_\delta &= RI_\delta + L \frac{dI_\delta}{dt} + \omega LI_\gamma + E_a \cos \beta \end{aligned} \quad (1)$$

ここで、 β は d - q 軸と δ - γ 軸間の負荷角で、 V_δ 、 V_γ はインバータの出力電圧の二軸成分電圧、 I_δ 、 I_γ は二軸成分電流、 E_a は同期電動機の誘導起電力であり次式で与えられる。

$$E_a = k_\psi \omega \quad (2)$$

ここで、 k_ψ は同期電動機の起電力係数である。また、二軸成分電流が定常状態であるとして、微分項を無視すると

$$\begin{aligned} V_\gamma &= RI_\gamma - \omega LI_\delta + E_a \sin \beta \\ V_\delta &= RI_\delta + \omega LI_\gamma + E_a \cos \beta \end{aligned} \quad (3)$$

のように簡略される。

図 2 は、回転座標変換した永久磁石同期電動機(PM)の誘導起電力軸を q 、インバータの出力電圧軸を δ 軸としたとき、この式に基づく電圧電流ベクトルの関係を示している。なお、同図は $V_\gamma=0$ としたときのベクトル図である。

なお、(2) 式において、 $V_\gamma=0$ 、 $I_\gamma=0$ とおくと

$$\begin{aligned} I_\delta &= E_a \sin \beta \\ V_\delta &= RI_\delta + K_\psi \cos \beta \end{aligned} \quad (4)$$

このとき、インバータからの電力 P は

$$\begin{aligned} P &= V_\delta I_\delta + V_\gamma I_\gamma = V_\delta I_\delta \\ &= (V_\delta E_a) \sin \beta / \omega L = (K_\psi / L) \sin \beta \end{aligned} \quad (5)$$

また、発生トルク T は

$$T = (p/2)P / \omega = (p/2)K_\psi \sin \beta / \omega L \quad (6)$$

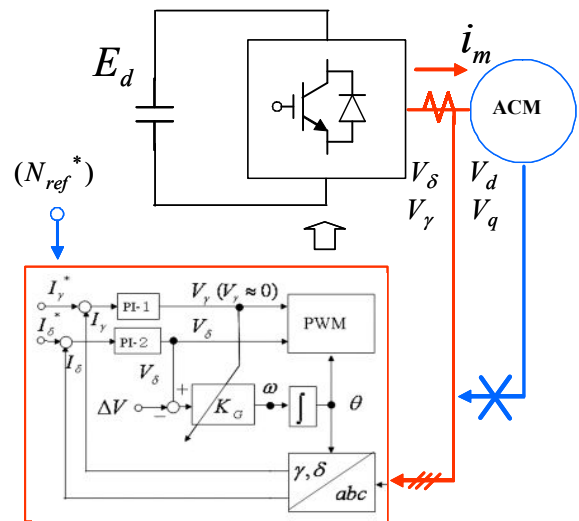


図 1 センサレス制御システム

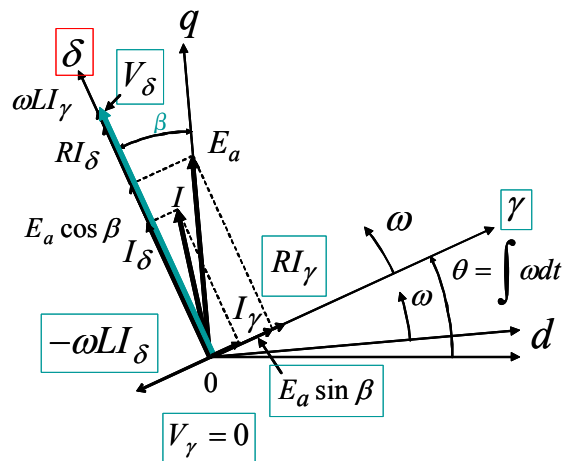


図 2 回転座標軸と電圧電流ベクトル

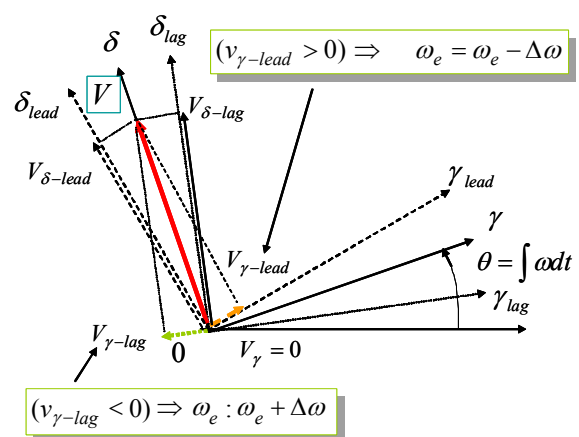


図 3 センサレス制御原理

< 2. 2 > 制御原理

さて、図3は、提案するセンサレス制御の原理を示すブロック図である。負荷角 β は電動機負荷の状態によって適切な値をとるが、誘導起電力軸 q に対するインバータの出力電圧軸 δ の位相角が適切でないと、インバータから出力する電圧の γ 軸成分電圧 V_γ が現われる。インバータの制御軸が適切な位相から遅れているときは、 $V_\gamma > 0$ となり、進んでいるときは $V_\gamma < 0$ となる。提案するセンサレス制御は、この電圧 V_γ の符号が応じて運転周波数 ω を追従制御することによっている。このとき、運転位相角 θ は

$$\theta = \int \omega dt \quad (7)$$

で与えられる。よってこのセンサレス制御原理は、 V_γ の符号のみにより、周波数を増減させ位相を追従制御させる方式であり、一般のセンサレス制御手法と違って、電動機の回路パラメータを用いていない点が、極めて大きな特徴となっている。

< 2. 3 > 制御システム

図1は、この制御原理に基づく基本制御システムであり、同図において、二軸電流成分電流 I_δ, I_γ の一定制御を行うと共に、電流制御器の出力から得られる二軸電圧 V_δ, V_γ の値をもとに V_δ から速度情報、 V_γ から位相情報 θ を得ている。位相 θ は次式の ω を積分(式7)することにより得ている。

$$\omega = K_G V_\delta \quad (8)$$

ここで、 K_G は V_γ の符号により自動的に調整され、定常状態では $V_\gamma = 0$ になる値に制御される。なお、 V_δ は(4)式より近似的に次式

$$V_\delta \approx k_\psi \omega \quad (9)$$

で示される量であり、(9)式を(8)式に代入すると

$$K_G \approx 1/K_\psi \quad (10)$$

したがって、位相追従制御ゲイン K_G の値は起電力係数の逆数($1/K_\psi$)で与えられるほぼ一定の値であり、負荷の変動によらずこの K_G は僅かな変化で適切な位相に追従制御させることができる。

図4は、これに速度制御ループを付加したセンサレス制御システムである。

電動機の運転速度 N は、同期電動機を駆動しているため運転周波数に比例した次式で与えられる。

$$N = (60/\pi) \omega_e \quad (11)$$

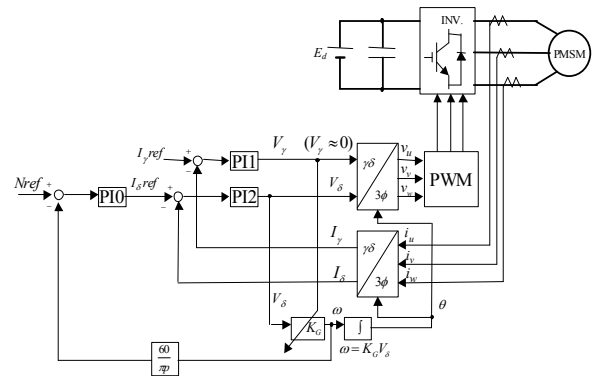


図4 PMSM センサレス制御システム

この速度が、速度基準 N_{ref} と一致するようにPI調節器を通して、トルク成分電流 I_δ^* を得、この電流に一致させる電流制御器の出力から電圧成分 V_δ を得ている。

一方、磁束成分電流 I_γ^* の基準値と一致させる電流制御器の出力から電圧成分 V_γ を得ている。

これら二軸電圧 V_δ, V_γ をもとに(8)式により運転位相を追従制御すると共に、インバータのPWM制御信号の入力に加え、PWM制御出力を電動機に加えている。そして、同期電動機への交流電流を検出して、二軸の電流制御量を求め、制御系を構成している。

このように、提案の制御システムは図4に示す通り、電動機の回路定数等を用いることなく、電流検出だけで制御システムを構成することが出来る。

3. センサレス制御の実験結果

< 3. 1 > 実験システム

図5に、実験システムを示す。同期電動機の機械的な負荷として電流制御器を接続した直流発電機をカップリングにて接続している。ここで、実験システムの回路パラメータを表1に示す。

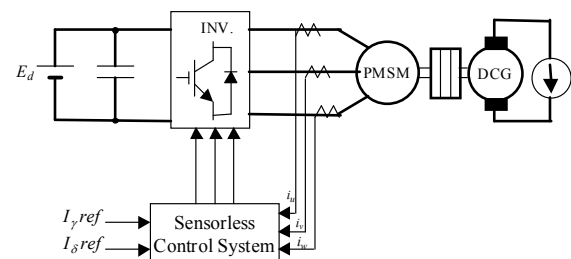


図5 実験システム

表 1 実験回路パラメータ

ACMOTOR		
PMSM 0.5 kw (SPMSM)		
R(stator resistance)	0.9	[Ω]
d-axis inductance	4.5	[mH]
q-axis inductance	4.5	[mH]
V/rpm	0.04	[V]
Poles	4	
rated torque	1.6	[Nm]
rated speed	3000	[rpm]
LOAD TORQUE		
Constant Torque	1.6	[Nm]
INVERTER		
Ed (DC Voltage)	280	[V]
I_{δ}^*	0	[A]
I_{γ}^* (Limit)	10	[A]

0.5kW の表面磁石同期電動機(SPMSM) を供試機とし、0.56 k W の直流発電機を負荷としている。インバータの制御には DSP 制御ユニットを用いており、PWM インバータのキャリア周波数は 10kHz で、電流制御の周期はスイッチング周期に同期させてセンサレス制御システムを構成した。

また、センサレス制御動作の確認のため、同期電動機に回転位置センサであるエンコーダを取り付け、以下にその位置情報を θ_M として表記している。

< 3. 2 > 始動特性

センサレス制御による SPMSM の始動特性を、図 6、図 7 に示す。いずれも速度基準は 3000min^{-1} で、始動時の立ち上がり指令時間は 0.1 秒である。図 6 は無負荷、図 7 は定格負荷トルク(1.6 Nm)における始動特性である。始動と同時にいずれも、制御システムで $V_{\gamma}=0$ 制御がかけられ、発生させた位相 θ とエンコーダからの位相情報 θ_M に比較から、始動から定常状態までスムーズな運転制御が行われていることが確認出来る。

< 3. 3 > 正逆転駆動

図 8 は、無負荷運転時において、速度指令値を緩やかに正逆転させたときの制御システムの応答特性である。また、図 9 は、定格トルク負荷時の正逆転駆動の制御動作波形である。いずれも、 $V_{\gamma}=0$ 制御ができ、安定なセンサレス制御動作が確認できる。なお、 V_{δ} は (9) 式で示すように、ほぼ速度に比例した応答特性を示している。負荷時の速度制御誤差は速度制御ゲインが低かったためである。図 10 は、図 9 の制御動作を 5 秒周期で行ったときの動作波形であり、速度反転時には慣性モーメント上、トルクが多く必要となる。

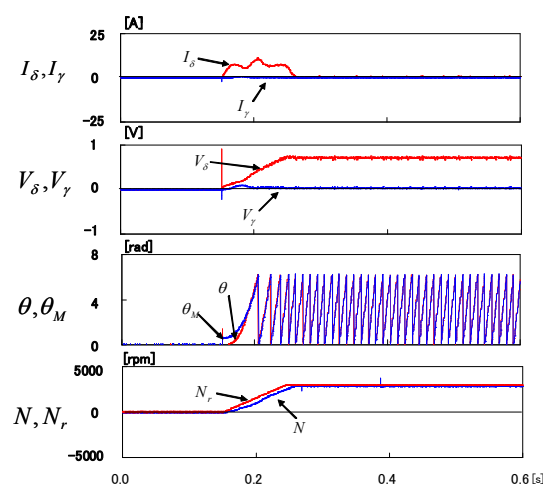


図 6 無負荷始動特性

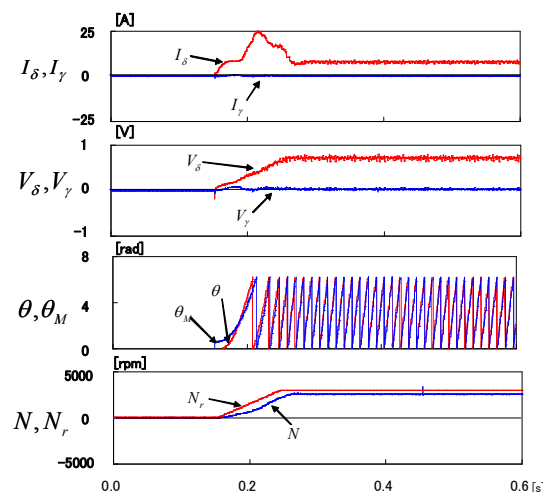


図 7 定格トルク負荷時始動特性

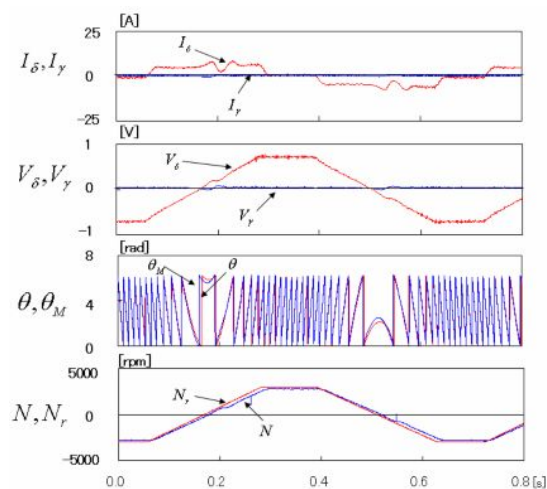


図 8 正逆転動作波形 (無負荷時)

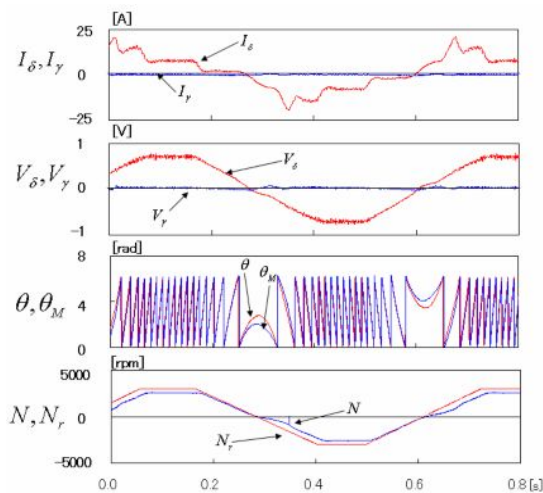


図9 正逆転動作（定格トルク負荷）

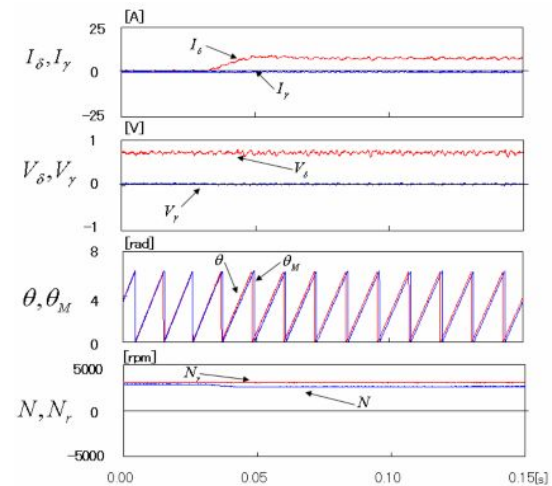


図11 負荷トルク変動特性

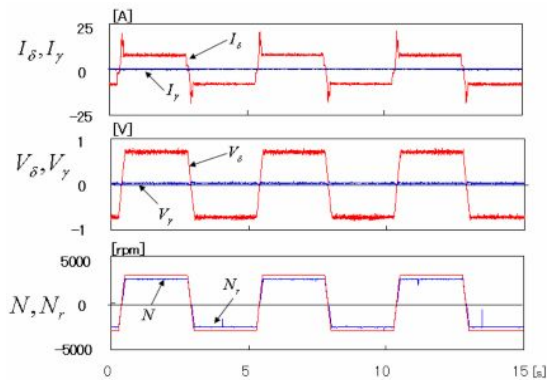


図10 正逆転動作（長周期動作）

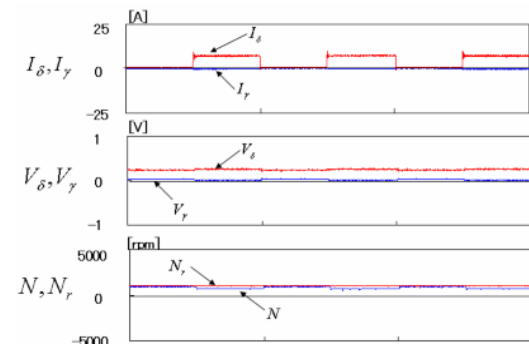


図12 パルストルク時の動作波形

そのためトルク成分電流 I_δ が電流制限値まで流れ、後の定常状態では定格トルク負荷に応じた電流が流れている様子が分かる。

＜3. 4＞負荷トルク変動特性

図11は、 3000min^{-1} で運転しているとき、負荷トルクを無負荷から定格負荷までステップ状に急変させた時の応答特性である。負荷トルクに比例してトルク成分電流 I_δ が急変している様子が分かる。また、センサレス制御で発生させたインバータの運転位相 θ とエンコーダからの実回転位相 θ_M と比較から、負荷がかかると負荷角 β だけ位相差が現われている様子が確認できる。

図12は、 1000min^{-1} で運転しているとき、無負荷と定格トルク負荷間でパルス状に負荷トルクを与えたときの動作波形であり、負荷トルク変化に応じてトルク電流 I_δ がステップ状に変化し、安定な運転が出来ていることが確認できる。

＜3. 5＞弱め界磁制御特性

PMSMは電動機の誘導起電力が電源電圧を超えるとト

ルク電流が流せなくなるので、速度制御の上限が存在する。そこで、PMSMを高速で駆動するとき、電動機の誘導起電力の発生を抑えるために弱め界磁制御が行われている。

提案するセンサレス制御システムにおいて、磁束成分電流 I_γ の値を負に制御することにより、弱め界磁制御することができる。

図13は、表1に示す同期電動機駆動システムにおいて、定格負荷トルクのもとで、インバータの直流動作電圧200Vで速度基準値を 6000min^{-1} と高くなったときの実験結果である。高速回転のため誘起起電力がインバータの直流電圧を超えてしまい、正常な運転ができないことを示している。なお、実験において、直流動作電圧を260Vにしたとき、速度基準が 6000min^{-1} でも安定に運転出来ることは確認している。

図14は、直流動作電圧200Vのもとで、磁束成分電流 I_γ の値を-7Aに設定したときの実験結果であり、直流動作電圧を高くしなくても、弱め界磁制御により、 6000min^{-1} で

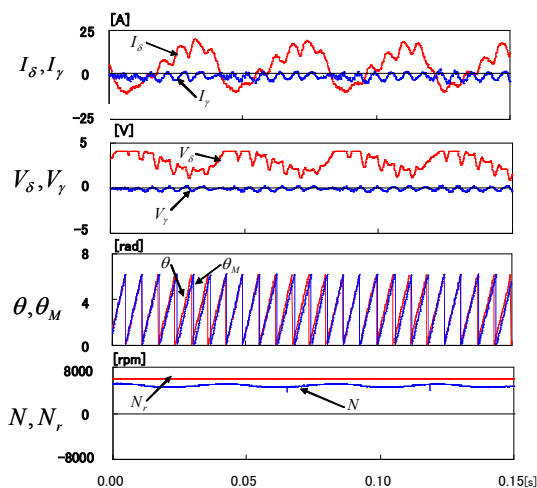


図 13 高速運転動作特性

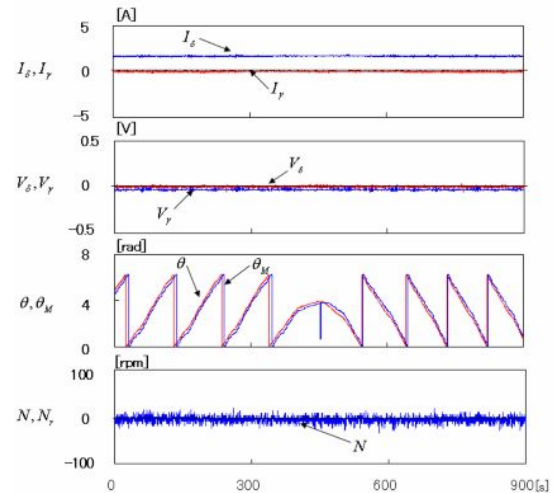


図 16 超低速正逆転駆動特性

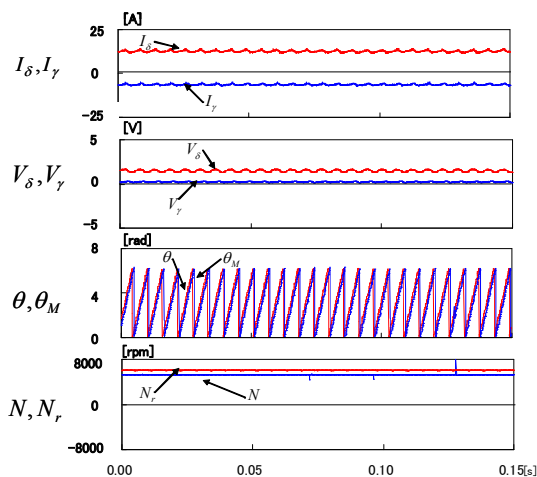


図 14 弱め界磁制御特性

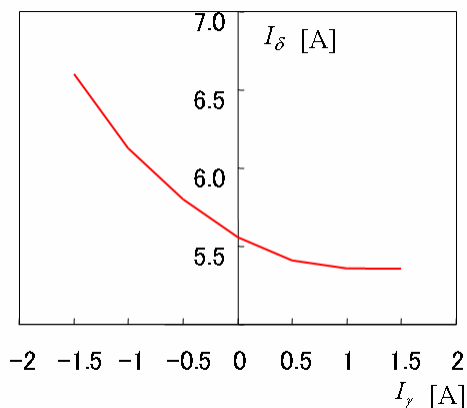


図 15 I_δ - I_γ 特性

安定に運転出来ることを示している。なお、磁束レベルが下がるので、トルク成分電流は 15A と大きな値となることを示している。

図 15 は、定格トルク一定で、速度基準が 1000min^{-1} 一定のもとで、磁束成分電流 I_γ を変化させたときの、トルク成分電流 I_δ との関係を実験により求めた I_δ - I_γ 特性である。磁束成分電流 I_γ を負にすると、弱め磁束制御の結果、定トルク負荷のためトルク成分電流 I_δ が増加することが分かる。なお、磁束成分電流 I_γ を正で増加した場合は、トルク成分電流 I_δ による弱め磁束成分を打ち消す作用分だけ、磁束が増加して I_δ が少し減少する程度に留まっている。提案するセンサレス制御では、モータパラメータによらないでシステムを構成することができるため、このような非線形特性のもとでも安定に制御できる。

永久磁石同期電動機を電気自動車の駆動に用いる場合、蓄電池電圧は限られているので、弱め界磁制御が必要とされるが、提案のセンサレス制御は I_γ の設定値を変えるだけで容易に制御出来る点も大きな特徴である。

＜ 3. 6 ＞超低速正逆転特性

図 16 は 1 回転 200 秒の超低速駆動時の動作波形で、エンコーダからの位相信号 θ_M とセンサレス制御システム内の位相信号 θ とはほぼ完全に一致していることが分かる。なお、定格負荷時にもほぼ同様の結果画得られることを確かめている。

4. 電気自動車駆動への適用と実験結果

＜ 4. 1 ＞試作電気自動車

ここでは、埋め込み磁石同期電動機(IPMSM)を駆動源と

する電気自動車を試作し、新しいセンサレス制御で問題なく駆動出来る実証試験についても行ったので、試作EVのその概要と基本的な駆動特性を以下に示す。

表2に駆動源として用いたIPMSMの仕様を示す。試作EVは、軽4輪自動車のエンジンをこの電動機に寄せ替えて、トランスミッションを介して車輪を駆動する機構とした。表3に、試作EVの仕様を前のエンジン車の仕様と比較して示す。

電動機を駆動するインバータは600V-600Aのスイッチング素子(IPM 2in1)を3つ用いて構成しており、センサレス制御用マイコンにはSH2-7045F(28.5 MHz)を用いた。なお、本センサレス制御は簡単な制御アルゴリズムであるため高度なマイコンを必要とせず、上記のマイコンでは余裕を持っての制御が可能である。

表2 IPMSMの仕様

IPMSM 15.0 kw (IPMSM)		
Rated speed	3000	[min-1]
Rated torque	39.8	[Nm]
Max speed	4500	[min-1]
Max Torque	94.0	[Nm]
Rated Current	53	[A]
Max Current	220	[A]

表3 試作EV車の仕様

項目		標準車(エンジン)	改造車(EV)
型式		E-EA11R	E-EA11R(改)
全長×全幅×全高 (mm)		3295×1395×1185	←
車両重量(kg)		690	700
乗車定員(人)		2	2
原動機	型式	F6A (657 cc)	IPMSM
	重量(kg)	90	40
	出力(kW)	48/6500min ⁻¹	15/3600min ⁻¹
	トルク(N・m)	85.26/4000 min ⁻¹	39.8/3600 min ⁻¹
	駆動源(容量)	ガソリン(30ℓ)	Ni-MH(201.6V-13Ah 60kg)



図17 試作電気自動車

なお、電気自動車用の電源としてNi-MHを用いた。エンジンルームとトランクルームに搭載し、電圧は201.6Vで容量は13 Ahである。図17に試作電気自動車を示す。

<4. 2> IPMSMのセンサレス始動特性

図18に、電気自動車に搭載したIPMSMのセンサレス制御による定格トルク時の起動運転波形を示す。二軸電流成分電流の無効成分電流 I_γ を指令値に維持しつつ、起動直後は加速に必要なトルクが加わりトルク成分電流 I_δ が上昇していることが確認できる。二軸電圧成分のうち V_γ は零に制御できており、また V_δ においても回転速度に応じて変化していることが確認できる。また、制御内部位置角 θ_e と電動機電気角 θ_M を見てもわかるように、電動機は同期外れを起こすことなく追従しており、正常に運転できていることが確認できる。

<4. 3> EV運転走行特性

図19は、試作した電気自動車を2名乗車状態で、第2速での始動から第5速まで切換えて加速走行した後、アクセルを戻してから機械的ブレーキをかけて停止するまでの自動車の加速度特性と、この積分値から得られる車体の走行速度特性を示している。

始動時の立ち上がりは、普通の軽自動車をしのぐ加速度であり、減速においても回生ブレーキから機械的ブレーキ動作まで安定に減速が可能であることが確認できる。

5. むすび

永久磁石同期電動機のセンサレス制御システムを提案した。このセンサレス制御手法は、これまで提案されている制御手法が回転位置推定のため、電動機の回路パラメータを用いていたのに対して、提案する制御法では成分電圧

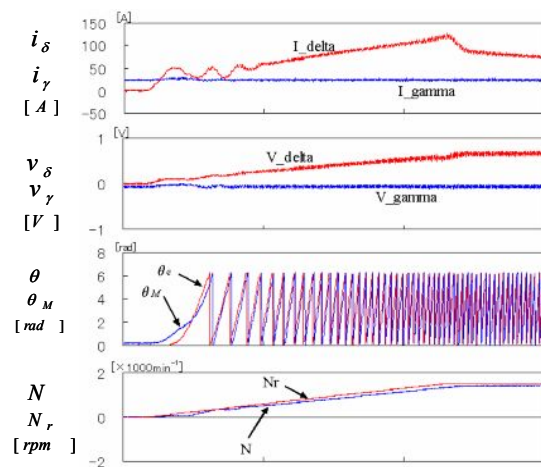


図18 起動運転動作波形

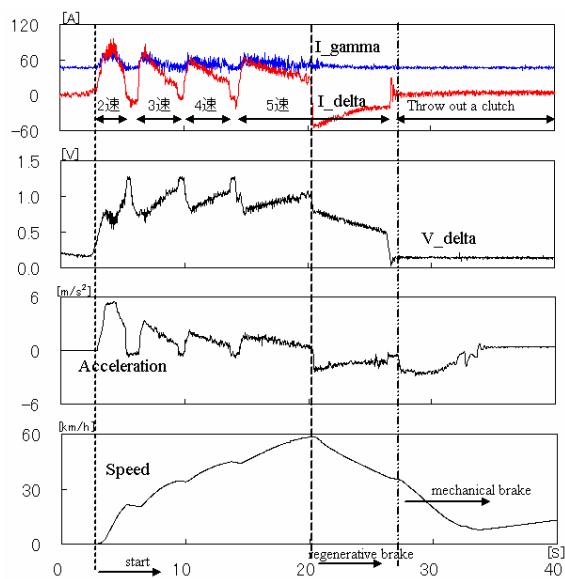


図 19 EV 運転走行特性

I_γ が零となるように適切な位相に追従制御する方式であるため、一般的回路定数の影響を受けにくく制御システムは極めてロバストであり、制御システムの構成も容易であることを示した。また、このセンサレス制御で表面磁石同期電動機の駆動試験を行ったところ、優れた運転特性が得られることを実験により実証した。

最後に、このセンサレス制御による埋め込み磁石同期電動機で駆動走行する電気自動車を試作した。走行実験を行ったところ、搭載されていた自動車エンジンの数分の一の容量の電動機で駆動した電気自動車が力強い駆動が出来るセンサレス制御の有効性を実証することができた。

本研究の一部は、平成 18 年度大学院ソシオテクノサイエンス研究部研究プロジェクトの支援を受けて行ったことを付記し謝意を表します。

文 献

- (1) 武田・松井・森本・本田：「埋込磁石同期モータの設計と制御」，平成 13 年 10 月 25 日発行、オーム社
- (2) Paul P. Acarnley and John F. Watson ; Review of Position-Sensorless Operation of Brushless Permanent-Magnet Machines, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL.53, NO2, APRIL 2006, p352-362
- (3) 大西：「インバータのセンサレス制御」，電気学会研究会資料，SPC-05-95 (2005)
- (4) 山中・大西・北條：「永久磁石同期電動機の位置センサレス電流ベクトル制御法」，電気学会研究会資料，SPC-05-103 p25-29 (2005)
- (5) 山中・大西・北條：「センサレス制御永久磁石同期電動機の実験特性」，平成 18 年電気学会産業応用部門大会，Vol.1-68 (2006)
- (6) 山中・大西・北條：「PM モータのセンサレス低速高トルク駆動特性」，平成 19 年電気学会全国大会，Vol.4-122 (2007)
- (7) Kenji Yamanaka, Tokuo Ohnishi, Masahide Hojo : A Novel Position Sensorless Vector Control of Permanent-Magnet Synchronous Motors, PCC Nagoya 2007, DS8-3-1 (2007)
- (8) 大西：「誘導電動機を駆動源とする速度センサレスインバータ制御電気自動車」，電気学会研究会資料，VT-07-03 (2007)